心理科学进展 2019, Vol. 27, No. 4, 611–622
Advances in Psychological Science DOI: 10.3724/SP.J.1042.2019.00611

·研究前沿(Regular Articles)·

触觉二维图像识别的认知机制*

於文苑[1,2] 刘 烨[1,2] 傅小兰[1,2] 龚江涛[3,4] 徐迎庆[3,4]

([1]中国科学院心理研究所，脑与认知科学国家重点实验室，北京 100101) ([2]中国科学院大学心理学系，北京 100049) ([3]清华大学未来实验室，北京 100084) ([4]清华大学美术学院信息艺术设计系，北京 100084)

摘 要 触觉二维图像可以辅助视觉受损人群，将视觉信息转化为触觉信息，从而感知外部世界。触觉二维图像的识别可能是通过触觉信息在大脑中进行“视觉转化”的方式而完成，并且会受到图形的几何特征、视角与透视、视觉经验、视觉表象能力、触觉探索过程、训练以及年龄的影响。探索触觉二维图像识别的认知神经机制，对于触觉二维图像设计的改进和可用性的提高，具有重要意义。

关键词 触觉二维图像；触觉；触知觉；视觉受损人群

分类号 B842

触觉是重要的感觉通道之一，可以在一定程度上代替视觉感受物体的空间特征(如形状)和纹理特征(如粗糙度) (Stilla & Sathian, 2008)。触觉二维图像是视觉信息转化为触觉信息的主要方式，可以辅助视觉受损人群通过触觉来感知和识别空间位置和图形图像(焦阳，龚江涛，史元春，徐迎庆，2016)。全球视觉受损人数约 2.53 亿(Barros, Maciel-Junior, Fernandes, Bezerra, & Fernandes, 2017)，需要通过听觉和触觉等其他通道的辅助来获得外界信息。然而，目前的触觉二维图像是在视觉二维图像的基础上形成的，可以被触觉有效识别的信息非常有限，不完全适于触觉识别(Heller, McCarthy, & Clark, 2005；龚江涛 等, 2018)。因此，为了提高视觉受损人群对触觉二维图像的使用效率和用户体验，需要研究触觉二维图像的认知加工机制，依据影响触觉二维图像识别的因素，来改善触觉二维图像的呈现方式，从而帮助视觉受损人群更有效地通过触觉二维图像来获取信息。本文总结了触觉的特点和触觉二维图像的生成与应用方式，综述了触觉二维图像识别的认知机制、影响因素以及神经基础，并且提出了触觉二维图像识别进一步的研究方向，以及对触觉二维图像设计的改进建议。

1 触觉的特点

触觉是人类获取外界信息的重要渠道之一(周丽丽 等，2017)。分布在皮肤上的机械感受器(mechanoreceptive)通过多种体表感觉传入纤维，将外界信息传入中枢神经系统，形成触觉(Saal & Bensmaia, 2014; Sathian, 2016)。触觉可以表征物体的材质属性，如粗糙度、易变性、防滑性、粘度、密度和重量等(Baumgartner, Wiebel, & Gegenfurtner, 2015)，也可以表征物体的空间属性，如朝向、曲度、长度、形状、大小和体积等(Kappers & Tiest, 2013)。触觉也可以通过以自我为中心(egocentric)和非自我为中心(allocentric)的参照系，表征自身和客体的空间位置(Hatwell, Streri, & Gentaz, 2003)。此外，触觉和视觉一样，遵循格式塔组织原则(Gestalt grouping principle) (Gallace & Spence, 2011)，如倾向于将接近的、相似的或连续的多个客体知觉为整体(van Aarsen & Overvliet, 2016; Chang, Nesbitt, & Wilkins, 2007; Overvliet, Krampe,

收稿日期：2018-05-04
* 中国国家自然科学基金重点项目(61632004, 61773379, 61375009)，中国国家自然科学基金委和德国基金会中德合作项目(NSFC 61621136008/DFG TRR-169)，国家重点研发计划课题(2016YFB1001402)。
通信作者：刘烨, E-mail: liuye@psych.ac.cn;
徐迎庆, E-mail: yqxu@mail.tsinghua.edu.cn

& Wagemans, 2012)。因此，在视觉被削弱的情况下，触觉可以在一定程度上代替视觉，感知空间、位置以及图形图像信息。

尽管触觉可以作为视觉的替代知觉，并且已有很多基于触觉的视觉替代性装置被投入使用(Segond, Weiss, Kawalec, & Sampaio, 2013)，但是触觉和视觉之间仍然存在巨大的差异。首先，相比于视觉，触觉的知觉域(perception field)更有限，只限于外界刺激与皮肤接触的面积(Longo & Golubova, 2017; Loomis, Klatzky, & Lederman, 1991; Yoshida, Yamaguchi, Tsutsui, & Wake, 2015)。其次，有限的知觉域使触觉无法像视觉一样对刺激进行整体加工，而只能进行序列加工(Loomis et al., 1991; Picard & Monnier, 2009)。第三，在触觉的序列加工过程中，需要将知觉到的信息暂时储存在工作记忆中，与随后知觉到的信息整合，才能形成对整体的表征(Yoshida et al., 2015)。因此，相对于视觉，触觉的知觉过程需要占用更多的工作记忆资源(Lacey & Sathian, 2014)，而且这一特点在表征客体的空间属性(如形状、大小、朝向等)时表现得更为明显(Picard & Monnier, 2009)。已有研究发现，当使视觉的知觉域范围限制为与触觉知觉域范围相一致时，视觉也只能对刺激进行序列加工，并且其对物体识别的绩效以及视觉的工作记忆容量均显著下降(Loomis et al., 1991; Picard & Monnier, 2009)。这说明，触觉与视觉在加工方式和工作记忆容量方面的差异主要是由于两者知觉域范围的差异导致的。

不过，虽然触觉和视觉两种模态之间存在差异，但是两者在表征信息的种类和所依赖的神经基础都有较大程度的重合(Amedi, Jacobson, Hendler, Malach, & Zohary, 2002; Sathian, 2016)，触觉和视觉表征在物体空间特征时都有中央后沟(postcentral sulcus)、顶内沟(intraparietal sulcus)和外侧枕叶皮层(lateral occipital complex)的参与，在表征物体纹理特征时都有内侧枕叶皮层(medial occipital cortex)的参与(Snow, Goodale, & Culham, 2015; Stilla & Sathian, 2008)。因此，触觉对于视觉受损人群而言，仍然是获得空间信息和图形图像信息的重要感觉通道。触觉二维图像是视觉信息向触觉信息转化的主要方式。根据视觉图像中的线条或轮廓，在可触摸的材料表面形成凸出的线条，从而使视觉二维图像转化为可触摸的触觉二维图像。因此，认识触觉二维图像识别的认知机制、影响因素和神经基础，对于促进视觉信息向触觉信息的转化，改进触觉二维图像的设计，以及提高触觉二维图像的识别效率，具有重要意义。

2 触觉二维图像识别的认知机制

对于触觉二维图像识别的认知机制，有研究者提出了“表象调节模型” (image-mediation model)理论，来解释人是如何通过触觉识别二维图像。根据这一理论，触觉二维图像的识别主要是通过“视觉转换” (visual translation)这一过程实现的。触觉感受器获取的线条、节点等信息，在头脑中转换并重组为视觉表象，然后将视觉表象与已储存的知识进行对比，完成对物体的识别(Klatzky & Lederman, 1988)。“表象调节模型”理论得到了一些研究证据的支持。首先，触觉二维图像的形象性(imageability)与明眼人蒙眼触摸识别的绩效有显著的正相关，即越形象生动的物体越容易被识别；其次，表象能力高的明眼人蒙眼时通过识别触觉二维图像的绩效更高；第三，没有视觉经验的先天盲人对触觉二维图像的识别绩效低于有视觉经验的明眼人和早期盲人的触觉识别绩效(Lederman, Klatzky, Chataway, & Summers, 1990)；第四，视觉经验越少的后天盲人，越不倾向于使用视觉表象策略记忆触觉二维图像(Lebaz, Picard, & Jouffrais, 2010)。这些研究结果都表明，视觉表象在触觉二维图像识别中具有重要作用，支持了触觉识别过程中存在“视觉转换”的过程。此外，其他研究发现，视觉–触觉的跨模态转换具有不对称性，当被试通过触觉进行二维图像学习，然后通过视觉对图像进行测验，其识别绩效比通过视觉学习再通过触觉接受测验的被试的绩效更低，说明视觉的表象可以帮助触觉的识别，而触觉表象对于视觉识别没有帮助(Behrmann & Ewell, 2003)，从而进一步支持了触觉二维图像识别中的“视觉转换”机制和“表象调节模型”理论。

然而，也有研究表明，在识别触觉二维图像时，先天盲人与蒙眼明眼人的识别绩效没有差异(Heller et al., 2006; Heller et al., 2005; Heller et al., 2009; Picard, Lebaz, Jouffrais, & Monnier, 2010)，这对于视觉经验以及“表象调节模型”中“视觉转化”的机制提出了质疑。这可能是由于，一方面，触觉二维图像识别的绩效受到多种因素的影响，

不同实验中检测触觉二维图像识别绩效的方式和评价标准存在差异，因而不同研究的结果不完全一致；更重要的是，“表象调节模型”理论可能只是触觉识别二维图像认知机制的解释方式之一，这一过程可能存在不止一种作用机制，对于缺少甚至没有视觉经验的盲人，大脑可能通过其他认知机制完成触觉二维图像的识别。最近的一项研究发现，影响明眼人触觉识别绩效的二维图像特征与影响盲人触觉识别绩效的二维图像特征有显著的差异(龚江涛 等, 2018)，这为存在不同的触觉识别二维图像认知机制提供了证据。

3　触觉二维图像识别的影响因素

如前文所述，由于大多数触觉二维图像是直接从现有的视觉二维图像转换而来的，这些二维图像可能具有不适于触觉识别的特征。因此，总结影响触觉二维图像识别的因素，对于认识触觉二维图像识别的认知机制，改进触觉二维图像的表现方式，以及提高触觉二维图像的识别绩效具有重要意义。

3.1　图像的几何特征

线条是构成触觉二维图像的基本元素，夹角是线条可以组成的最基本的图形之一。因此线条和夹角会在触觉过程中引发更多的注意和加工，是触觉二维图像识别的重要步骤(Grunwald et al., 2014)。线条的弯曲和线条的起始点均会引起更多的触觉探索(Grunwald et al., 2014)；此外，触觉对于夹角角度的感受性比较敏锐，差别阈限大约在4~7 度左右，且对于角度的感受性不会受到夹角朝向的影响(Toderita, Bourgeon, Voisin, & Chapman, 2014)。识别夹角的关键在于夹角的两条边是否相交，有明显顶点的夹角更容易通过触觉被知觉为夹角(Wijntjes & Kappers, 2007)。这表明，夹角的顶点，而非夹角的朝向，对于夹角的识别具有关键作用。

图像的对称性、复杂度会对触觉二维图像的识别产生影响。在触觉二维图像识别过程中，图像的对称性与被试对图像的识别绩效成正相关，具有对称性的图像容易被识别(Kalia & Sinha, 2012)。而且相比于其他图像的规律性，如重复性，触觉对于对称性的探测能力更强(Cecchetto & Lawson, 2017)。图像的复杂度与被试对图形的识别绩效成负相关(Kalia & Sinha, 2012)，被试的识别绩效会随着图像复杂度的增加而下降(Yu et al., 2017)。

此外，图像的大小也会影响触觉二维图像的识别。相对于小尺寸的图像，大尺寸的图像提供了更高的分辨率，可以展示更多细节，因此更容易被识别(Wijntjes, van Lienen, Verstijnen, & Kappers, 2008)。然而，该研究并未进一步考察图像大小与其指代物体的实际大小的一致性是否会影响具体图像的识别，当图像的大小与物体实际的大小不相符时，即使大尺寸的图像提供了更多的细节，物体图像的触觉识别绩效可能不会提高。

3.2　视角与透视

当在二维平面上表现三维物体的图形时，构成图形的线条的朝向及长度会根据透视原理(perspective)，产生一定程度的变化，从而提供空间深度线索，表现为“近大远小”，即距离观察者越近的物体部位在二维平面上呈现的面积越大(Heller et al., 2002)。此外，透视的表达也因视角(viewpoint)的不同而发生变化，例如，一个正方体在俯视视角下的二维图像是正方形，不具有深度线索；而在正面斜上方 45 度的视角下，其二维图像包括呈现为正方形的正面和呈现为梯形的顶面，说明顶面的形状根据视觉透视原理产生了变化。但是视觉可以非常容易地将物体知觉为正方体并将顶面知觉为正方形。现有的视觉二维图像中，表现的是常见视角下的三维物体，通常是三维视角(three-dimension view, 3-D view)，即侧面斜上方 45 度的视角。然而，根据视觉的常见视角和透视原理形成的二维线条图，不一定完全适合触觉识别(Hatwell et al., 2003)，以往的研究发现主要可以分为以下两个方面。

首先，当蒙眼明眼人识别触觉二维图像时，相比于不具有深度线索的物体图像，三维视角下的物体图像的识别正确率更低，所用时间更长(Lederman et al., 1990)。这说明，虽然三维视角下的物体图像适于视觉识别，但会增加其触觉识别的难度。

其次，在识别三维物体的二维图像时，会表现出视角的偏好。在 Heller 的系列研究中，要求蒙眼明眼人被试先触摸一个真实的轴对称简单几何体(如三棱柱、正方体等)，然后从 4 张三维物体的二维图像中选出与该几何体一致的图像。结果发现，第一，顶面视角(top view)下二维图像的识

别率最高，而且即使被试被要求不能触摸真实物体的顶面时，顶面视角下二维图像的识别正确率仍然最高(Heller et al., 2002; Heller et al., 2006)，这表明这些三维物体的触觉二维图像的识别具有顶面视角的偏好，这可能是由于该实验中使用的三维物体在顶面视角下能够表现出最多的信息。此外，这种顶面视角偏好与被试触摸时的身体姿态无关，当线条图垂直于地面时，被试需要触摸位于其正前方的、垂直面上的线条图，此时被试的识别仍然表现出顶面视角的偏好，这说明在对水平放置的触觉图像进行识别时，被试没有因为手部触摸水平面而将该图像知觉为物体顶面的倾向(Heller et al., 2006)。然而，这种顶面视角优势受到任务难度和任务类型的影响，当三维物体由简单的几何体变为复杂几何体时，或将作为目标的真实三维物体也换做三维物体的二维图像时，触觉二维图像识别的顶面视角优势消失(Heller et al., 2006; Heller et al., 2009)。第二，三维视角在一定的条件下会促进触觉二维图像的识别。当要求被试在 4 个二维图像备选项中选出与目标二维图像一致的选项时，如果目标二维图像是三维视角，被试的选择绩效更高；而当二维图像备选项是三维视角时，则不会表现出类似的优势。这说明，三维视角下的目标选项提供了更多的物体信息，从而提高触觉二维图像的识别。第三，在正面视角(frontal view)下，根据点透视原理形成的二维图像的识别正确率显著高于根据平面透视原理形成的二维图像的识别正确率(Heller et al., 2002)，说明透视也会对触觉二维图像的识别产生影响。

上述研究结果都表明，触觉二维图像的视角及透视会影响其识别，而且这种影响会因任务类型以及三维物体的复杂程度而产生变化。

3.3 视觉经验

视觉经验在触觉二维图像识别中的作用一直存在争议。目前的触觉二维图像是在视觉二维图像的基础上形成的，明眼人有非常丰富的视觉二维图像的经验，而盲人，尤其是先天盲人，他们很少有，甚至没有对于二维图像的视觉经验，这可能导致盲人不能有效地识别这些触觉二维图像，这一观点得到了研究证据的支持(Lederman et al., 1990)。然而，也有研究发现，盲人的触觉二维图像的识别绩效与具有大量视觉经验的明眼人没有差异(Heller et al., 2006; Heller et al., 2005; Heller et al., 2009; Picard et al., 2010)。因此，需要通过比较盲人和明眼人之间触觉二维图像识别的差异，来进一步对视觉经验在此过程中的作用进行探讨。

很多研究发现，在识别触觉二维图像时，盲人没有由于视觉经验的缺乏而表现出比明眼人更差的识别绩效。在 Heller 等人实施的一系列关于触觉二维图像识别的实验中，要求被试通过触觉，从 4 个三维物体的二维图像中选出与目标几何物体对应的图像。结果发现，无论目标物体是简单几何物体还是复杂几何物体，先天盲人与蒙眼明眼人的识别绩效没有显著的差异，而且当目标物体是简单几何物体时，先天盲人和明眼人都表现出顶面视角下的二维图像的识别优势(Heller et al., 2002; Heller et al., 2006; Heller et al., 2009)。另外，在触觉二维图像的记忆任务中，要求被试记忆由线条和点组成的简单路线图，结果发现，虽然采用了不同的记忆策略，但是蒙眼明眼人与先天盲人的绩效没有差异(Picard et al., 2010)。此外，其他研究结果表明，即使早期盲人缺乏视觉经验，他们在触摸并且重新画出二维图像时，他们会采用和明眼人相同的“向心执行原则” (centripetal execution principle)，即先确定图像轮廓，再表现图像中心的内容(Bouaziz, Russier, & Magnan, 2005)。这说明，在不依赖视觉经验和视觉表象的情况下，早期盲人也可以对二维图像进行与明眼人类似的表征(Lacey & Lawson, 2013)。这些结果都说明，视觉经验可能对于触觉二维图像的识别没有帮助。

此外，对于视觉模态下特有的二维图像表象方式，如透视和视角，虽然先天盲人没有关于透视和视角的直接经验，但是可以通过学习和训练，理解这些视觉空间表象规则。当要求被试触摸两个连在一起的、夹角呈一定角度的木板，然后从备选的二维图像中选出与之相符的图像。结果发现，先天盲人、后天盲人和明眼人之间的识别绩效没有差异。更值得关注的是，当要求被试画出某一视角下，木板所呈现的形态时，先天盲人的画中也会有一定的透视规则的体现，即长方形的木板在二维图画中没有呈现为长方形，而是根据视角和透视原则发生了一定程度的改变(Heller et al., 2002)。此外，也有研究发现，盲人也可以在三维空间中理解并运用透视规则(Wnuczko & Kennedy, 2014)。这说明，即使没有或者很少有视觉经验，

盲人也可以理解视角和透视。不仅如此，有个案研究发现，通过指导和训练，先天盲人也可以画出不同视角下符合透视规则的三维物体的二维图像(Kennedy & Juricevic, 2006)。

然而，视觉经验对于触觉二维图像识别的影响可能没有体现在识别绩效上，而是体现在触觉识别过程中所使用的表象策略上。视觉经验是形成视觉表象的关键，视觉经验的缺失使盲人主要依靠触觉和听觉，进行表象加工，而非视觉(Cattaneo et al., 2008; Cattaneo, Vecchi, Monegato, Pece, & Cornoldi, 2007)。因此盲人具有较差的视觉表象能力，从而导致在识别触觉二维图像时，不会使用视觉表象策略。在触觉二维图像记忆任务中，要求蒙眼明眼人和盲人被试通过触觉记忆简单线路图，然后进行再认测试，并且在测试后报告其所使用的记忆方法，由主试根据被试的报告对其采用的图像表象策略进行判断。结果发现，虽然蒙眼明眼人和盲人在记忆任务的绩效上没有差异，但是明眼人更倾向于使用视觉表象策略，即被试通过想象二维图像的形象来进行记忆，而先天盲人只使用非视觉表象策略进行记忆，即将图像编码为语义信息(如：“Z”字形)和图像各个部分的相对位置信息(如：直线的右边有一个点)，或通过记忆触摸时的手指移动的轨迹来进行记忆(Cornoldi, Tinti, Mammarella, Re, & Varotto, 2009; Picard et al., 2010)；后天盲人会同时采用这两种策略，但是，后天盲人对非视觉表象记忆策略的选择，与其失明年龄和失明时间占生命中的比例显著相关(Lebaz et al., 2010)，这说明，视觉经验越少的后天盲人，越倾向于选择非视觉表象策略。这些结果都表明，视觉经验会影响二维图像的触觉识别，这种影响可能是通过改变触觉识别中使用的策略而实现的。

以上研究结果表明，视觉经验对于触觉识别二维图像不是必要的(Heller et al., 2005)，对于提高二维图像的触觉识别绩效可能没有帮助，但是可以通过其他的方式影响二维图像的触觉识别。

3.4　视觉表象能力

根据“表象调节模型”理论以及上文中提到的部分研究，对于明眼人而言，视觉表象是触觉二维图像识别的关键阶段，因此，视觉表象能力是影响二维图像触觉识别的因素之一。这一观点得到了研究证据的支持。一方面，相关分析发现，明眼人触觉二维线条图识别的绩效与其视觉表象能力成正相关(Lederman et al., 1990; Picard et al., 2010)；另一方面，通过视觉表象测验成绩，将高视觉表象能力的被试和低视觉表象能力的被试进行区分，发现高视觉表象能力的被试的触觉二维图像识别的绩效更高(Lebaz, Jouffrais, & Picard, 2012)。这些结果都表明，视觉表象能力在明眼人触觉二维图像识别的过程中起重要作用。

3.5　触觉的探索过程

触觉识别是通过手部在可触摸物体表面的移动而实现的，这种具有目的性的手部移动被称为触觉的探索过程(exploratory procedures, EP) (Klatzky & Lederman, 1988)。在触觉探索过程中，还存在类似眼动过程中的注视停留阶段，即探索暂停(exploratory stop, ES)。触觉的探索暂停的出现可以反映触觉过程中注意的偏好，以及预测探索过程的时长(Grunwald et al., 2014)。常见的探索过程包括手指侧面移动(lateral motion)、按压(pressure)、静触(static contact)、轮廓追踪(contour following)和围绕(enclosure)，且每一种探索过程都有适合其探索的触觉特征，如侧面移动适于探索纹理，轮廓追踪适于探索轮廓和形状(Kalia et al., 2014)。此外，当面对一个陌生的触觉二维图像时，被试一般倾向于先用手掌来确定图像的位置和范围，然后用手指进行细节的触摸(Symmons & Richardson, 2000)。

因此，选择适合的触觉探索过程有利于触觉识别的完成。研究表明，习得了正确的触觉探索过程的盲人儿童，其触觉二维图像识别的绩效有显著提高(Vinter, Fernandes, Orlandi, & Morgan, 2012)，例如，当使用多个手指进行触觉探索时，蒙眼明眼人与盲人的触觉二维图像识别的绩效均会提高(Morash, Pensky, Tseng, & Miele, 2014)。不过，通过习得正确探索过程这一方式来提高触觉识别绩效的前提是，有已经被验证的、适合探索某一类触觉特征的探索过程。然而，对于触觉二维图像而言，目前尚未形成具体的、适用于触觉二维图像不同特征的探索过程。有研究者借助计算机技术，根据概念的层级关系和语义关联，将属于同一个概念层级的物体图像，或是语义关联更强的物体图像，划分在同一个部分，并按照概念层级的高低和语义关联的程度，由整体到细节逐步为被试呈现图像的不同部分，从而形成了一

种在人机交互环境下的触觉探索过程。在这种探索过程中，被试先触摸图像的整体，然后触摸局部细节，而且相同类别的部分或语义关联度更强的部分会同时触摸(Rastogi, Pawluk, & Ketchum, 2013)。这不仅符合人的概念表征方式，也弥补了触觉序列加工的缺陷，更有助于触觉二维图像的识别。

3.6 训练

触觉二维图像识别的能力也可以通过相应的训练来增强。一方面，触觉二维图像的使用经验可以促进识别绩效的提高。在盲人儿童与明眼人儿童的对比研究中发现，盲人儿童比明眼人儿童拥有更多的触觉二维图像的使用经验，因此他们对触觉二维图像的识别绩效优于明眼人(Picard, Albaret, & Mazella, 2014)。不仅如此，对于早期盲人儿童，触觉二维图像使用经验越多的盲人儿童，其识别绩效更高(Theurel, Witt, Claudet, Hatwell, & Gentaz, 2013)。另一方面，盲人可以通过指导和训练，理解视觉模态下特有的透视规则，并且可以在二维平面中画出符合透视规则的三维物体图像(Heller et al., 2005; Kennedy & Juricevic, 2006)。这些结果都表明，有针对性的训练可以促进触觉二维图像的识别。

3.7 年龄

很多研究发现，触觉二维图像的识别能力随着年龄的增长而变化。一方面，触觉二维图像识别的能力随年龄的增长而增强，相比于成年人，儿童和青少年的识别能力较低(Mazella, Albaret, & Picard, 2018; Overvliet & Krampe, 2018)，而且对于青少年而言，其触觉二维图像识别的能力与年龄成正相关(Picard, Albaret, & Mazella, 2013)。触觉二维图像识别能力与年龄之间的关系，可能与触觉形状辨别能力(Mazella et al., 2018)、工作记忆容量和空间参照系(Overvliet & Krampe, 2018)随年龄增长不断完善有关。此外，触觉二维图像识别能力的可塑性随年龄增长而减弱。研究发现，触觉探索过程的训练可以提高盲人儿童的触觉二维图像的识别绩效，但是对于青少年盲人和成年盲人没有帮助(Vinter et al., 2012)。另一方面，关于老年人和青年人触觉二维图像识别能力的研究发现，老年人的触觉二维图像识别的绩效较差，而且这种差异在识别复杂二维图像时更加明显。然而，在识别之前提供了物体类别后，老年人与青年人的识别绩效的差异减小(Picard et al., 2013)。这表明，相对于青年人，老年人在识别“视觉转化”后的提取已储存信息的能力变差，而非“视觉转化”能力减弱。因此，当提供了物体类别后，从长时记忆中提取信息的负荷减弱，从而使其与青年人之间绩效的差异缩小(Overvliet, Wagemans, & Krampe, 2013)。

上文所总结的触觉二维图像识别的影响因素，不仅可以各自对触觉二维图像的识别产生影响，各个因素之间可能也存在相互作用，并共同影响触觉二维图像的识别。例如，触觉二维图像的几何特征、视角和透视规则会影响图像的识别，但是视觉经验，以及有针对性的触觉二维图像的识别训练可能会通过促进对图像的几何特征、视角和透视规则的理解，或通过提高视觉表象能力，或通过选择合适的触觉探索过程，来促进触觉二维图像识别；而视觉经验、视觉表象能力、触觉探索过程的习得，以及训练的效果，均可能随着年龄的增长产生相应的变化，在不同年龄段的人群中表现出差异。因此，在探究触觉二维图形识别的影响因素的研究中，不仅要研究哪些因素会影响触觉二维图形识别，更需要关注因素之间的相互作用，建立更具有生态效度和应用意义的触觉二维图像识别的认知模型。

4 触觉二维图像识别的神经基础

目前，针对触觉二维图像识别神经基础的研究还非常有限，现有的研究结果基本是关注某一图像特性在触觉通道下的加工，其研究对象只是简单的图像模式(pattern)，不是具体物体的二维图像。因此，触觉二维图像识别的神经基础需要进一步探究。不过，尽管目前没有直接的研究证据明确地指出触觉二维图像识别的神经基础，根据已有的研究结果仍然可以推测可能参与触觉二维图像识别的脑区。

一方面，由于触觉二维图像在视觉二维图像的基础上形成，并且触觉和视觉物体识别的神经基础上存在一定程度的重合(Amedi et al., 2002; Yau, Kim, Thakur, & Bensmaia, 2016)，因此，这些重合的区域可能参与触觉二维图像识别。在关于触觉工作记忆的研究中，被试依次触摸 3 个凸点线条形成的夹角，然后对测试夹角进行再认，判断这个测试夹角是否在先前出现过。在这一任务

中，发现额下回(inferior frontal gyrus, IFG)、后顶叶(posterior parietal cortex, PPC)，以及额中回(medial frontal gyri, mFG)的激活(Yang et al., 2014)，而这些脑区同样参与视觉工作记忆过程(Kaas, van Mier, Visser, & Goebel, 2013)。因此，这些区域可能在视觉和触觉工作记忆的过程均会发挥作用(Yang et al., 2014)；此外，在通过触觉判断三维物体的形状时，外侧枕叶(lateral occipital, LO)会被激活，说明该区域在视觉和触觉的形状识别过程中均会发挥作用(Bauer et al., 2015; Lacey & Sathian, 2014; Lacey, Stilla, Sreenivasan, Deshpande, & Sathian, 2014)。这些同时参与到触觉和视觉物体表征中的脑区可能是触觉二维图像识别的神经基础。另一方面，触觉对物体特性的表征还存在特异性的脑区，这些脑区也可能是触觉二维图像识别的关键区域。在通过触觉辨别凸点图像的周期性(periodicity)时，中央后回(postcentral gyrus)和顶上小叶(superior parietal lobule, SPL)会激活，说明这些脑区参与触觉对物体周期性特征的知觉(Yang et al., 2017)。而在通过触觉辨别凸点图像的对称性时，相比于视觉辨别对称性，距状沟周围皮层(peri-calcarine area)在触觉对称性辨别时会被激活，因此该区域可能在图像对称性的触觉识别起关键作用(Bauer et al., 2015)。此外，尽管触觉和视觉工作记忆的神经基础有重合，但是右侧后顶叶(right posterior parietal cortex, right PPC)只参与触觉工作记忆的过程，可能是负责触觉工作记忆的特异性脑区(Ku, Zhao, Bodner, & Zhou, 2015; Yang et al., 2014)，然而，目前关于触觉识别物体特征神经基础的研究比较有限，触觉二维图像，尤其是具有较高生态效度的触觉二维图像，对其识别的神经基础的研究更加有限，因此，触觉二维图像识别的认知神经机制仍不明确。

5　触觉二维图像的生成与应用

触觉二维图像是视觉信息转化为触觉信息的主要方式之一。根据视觉图像中的线条或轮廓，通过压印、热塑、盲文触点打印的方式，改变材料(纸张或者塑料)的部分形状，在材料表面形成凸出的线条，从而使视觉二维图像转化为可触摸的二维图像(Kalia et al., 2014)。然而，通过这些方式形成的触觉二维平面图的制作耗时，不易保存和搬运，而且制成的每一张图只能固定表现一个图像，不能重复循环利用(Vidal-Verdu & Hafez, 2007)。为了增强可用性，研究者发明了一种电子的触觉图像生成器，它将视觉图像的每个像素转化为相应的触点，视觉二维图像的线条对应位置的触点相对凸出，凸出的触点形成凸起的线条，从而实现视觉图像到触觉图像的转化(Bellik & Clavel, 2017; Vidal-Verdu & Hafez, 2007; 焦阳，龚江涛，徐迎庆, 2016)。有研究者在这种静态触觉图像生成器的基础上，制作了动态触觉图像生成器。相比于静态触觉图像生成器一次性呈现整个线条图，动态触觉图像生成器根据使用者所触摸的图像位置，在使用者手指部位形成图像相应位置的凸点，因此只需表现图像的局部(Rastogi et al., 2013)。这种触觉图像生成器成本低，占用空间小，但是要求使用者只能用手指触摸图像局部，而不能用手掌触摸图像整体(Vidal-Verdu & Hafez, 2007)。

由于生成技术的不断发展，触觉二维图像在盲人辅助设计领域得到了较为广泛的应用(Pawluk, Adams, & Kitada, 2015; Trief, Cascella, & Bruce, 2013)。触觉地图(tactile map)是触觉二维图像的一种典型的应用方式。触觉地图在视觉地图的基础上，将地图中的线路、地标等元素通过凸点的线条、符号或纹理来表示，从而达到辅助盲人获得空间位置信息的目的(谌小猛，李闻戈，2016; Hatwell et al., 2003)。传统的单纯呈现触觉图示的触觉地图可以表达的信息相对有限，而且其熟练使用需要一定的学习过程，近年来也有研究者对触觉地图进行了改进，如将触觉地图中的地标改为立体的指示物(Gual, Puyuelo, & Lloveras, 2015)，或将触觉地图改进为交互式触觉地图，添加了语音反馈和触觉震动反馈(Brock, Truillet, Oriola, Picard, & Jouffrais, 2015; Memeo, Campus, & Brayda, 2014)，提高了触觉地图的有效性。触觉二维图像的另一个主要应用是表达具体物体的凸点线条图(raised-line drawing)，通常作为盲人教育的教学用具，来帮助盲人获得知识(杨光，钟经华，董晶, 2017; 张蕾，刘建英, 2014)。这种线条图也可以用于制作适用于盲人的心理测量工具(Mazella, Albaret, & Picard, 2014; Mazella, Albaret, & Picard, 2016)。

在已有的触觉二维图像生成和应用工具中，具体物体的触觉二维图像均是在视觉二维图像的

基础上，直接将图像线条转化为可触摸的凸点线条，图像仍然保留了适于视觉识别的特性，如因遮挡关系、视觉透视和视角产生的线条的变化。然而这些特性在触觉识别的条件下，会对物体学习和识别产生影响，甚至会对触觉识别产生阻碍(龚江涛 等, 2018)。因此，改进触觉二维图像生成和应用的方式，要重视触觉通道和视觉通道的差异，探究触觉输入的二维图像信息转化为三维空间表征知识的机制，在此基础上认识触觉二维图像识别的认知机制及影响因素，改善二维图像在触觉线条图上的表现方式，从而提高触觉线条图使用效率。

6 研究展望

上述的研究总结了影响触觉二维图像识别的影响因素、认知机制和神经基础，然而，二维图像的视觉特征如何在触觉模态下表现仍需要进一步的研究，触觉二维图像识别的认知神经机制也尚不明确。目前，二维平面图像的触觉认知研究尚处于起步阶段，未来仍存在大量的科学问题和实际应用问题有待解决。

首先，触觉二维图像识别的认知神经机制尚不清楚。尽管“表象调节模型”理论在一定程度上说明了触觉二维图像识别的认知机制，但是不能全面地解释明眼人与盲人的触觉二维图像识别的认知过程。目前的研究发现，明眼人与盲人在触觉二维图像识别时所依赖的图形图像特征有明显的差异(龚江涛 等, 2018)，说明这两类群体的触觉二维图像识别的认知机制可能不同，需要有更加完善的理论对这一认知机制进行解释。此外，触觉二维图像识别的神经基础方面的研究也较为缺乏。目前关于这一方面的研究主要聚焦于视觉与触觉识别物体时神经基础的异同(Lacey & Sathian, 2014)，并且更多地关注识别三维物体(Snow et al., 2015)或者简单图像特征(如对称性)(Bauer et al., 2015)的视触觉神经基础，而没有研究触觉识别二维物体图像(尤其是具体物体的二维图像)的神经机制，以及触觉与视觉识别二维物体图像的神经机制的差异。

其次，触觉输入的二维图像信息是否可以转化为三维空间表征知识，如果可以，那么其认知神经机制是什么，这一系列问题尚不明确。明眼人拥有大量的三维物体和二维图像的视觉经验，在识别触觉二维图像时，可以通过视觉表象将触觉输入的信息转化为视觉表象，进而转化为三维物体知识(Lebaz et al., 2010; Lederman et al., 1990)。然而，当没有或者少有三维物体和二维图像的视觉经验时，盲人是否还能通过触觉输入的二维图像信息获得三维物体知识并完成触觉二维图像的识别，这一问题尚不清楚。如果答案是肯定的，即盲人也可以凭借触觉输入的二维图像信息来获得三维物体知识，那么其背后的认知机制也需要进一步研究。

第三，如何设计更加适合视觉障碍人群使用的触觉二维图像的辅助设备，仍有待进一步的研究。由于通道的差异，直接由视觉二维图像转化得到的触觉二维图像不一定适用于触觉识别。因此，需要根据触觉的特点以及影响触觉二维图像识别的因素，改善触觉二维图像的设计。已有研究对于触觉的序列加工特点对于触觉图像进行分步序列呈现(Rastogi et al., 2013)，并且添加了触觉引导和语音说明，引导盲人按照设定的顺序来触摸图像(焦阳等, 2016; Brock et al., 2015; Memeo et al., 2014)，提高了触觉二维图像的识别效率。然而，还有许多不适合触觉识别的因素需要被改善，如视觉二维图像中常用的表达物体表面反光的线条，因物体重叠而省略的线条，以及通过近大远小表达深度线索的画图原则等，可能都不适合二维图像的触觉识别，需要在认识触觉二维图像识别认知机制的基础上，对触觉二维图像进行改进，选择更加合适的方式对三维立体信息进行降维，并通过二维平面来表达，从而提高触觉二维图像的可识别程度。

最后，未来的研究需要探索是否可以通过训练来提高视觉障碍人群对于二维图像的触觉识别。如前文所述，训练可以提高触觉识别的绩效(Picard et al., 2014; Theurel et al., 2013)以及帮助盲人理解透视原则(Kennedy & Juricevic, 2006)。因此，尽管目前很难设计出非常适合触觉识别的二维图像，但是盲人可能可以通过学习和训练，理解这些由视觉二维图像转换而来的触觉二维图像的设计原则(如通过近大远小表达距离和深度，通过物体表面的线条表达表面的反光等)，并能够对二维平面信息进行升维，构建出三维立体信息，进而从应用的角度提高视觉障碍人群对触觉二维图像的识别。

参考文献

谌小猛, 李闻戈. (2016). 触觉地图辅助盲人建构陌生环境空间表征的研究. *中国特殊教育,* (9), 36–42.

龚江涛, 於文苑, 曲同, 刘烨, 傅小兰, 徐迎庆. (2018). 影响触觉图像识别因素的量化分析. *计算机辅助设计与图形学学报, 30*(8), 1438–1445.

焦阳, 龚江涛, 史元春, 徐迎庆. (2016). 盲人触觉图形显示器的交互体验研究. *计算机辅助设计与图形学学报, 28*(9), 1571–1576.

焦阳, 龚江涛, 徐迎庆. (2016). 盲人触觉图像显示器 Graille 设计研究. *装饰,* (1), 94–96.

杨光, 钟经华, 董晶. (2017). 浅谈视障教学中触觉图形的认知. *现代特殊教育,* (23), 59–61.

张蕾, 刘建英. (2014). 盲校地理课程触觉地图的开发与应用研究. *中国特殊教育,* (3), 24–29.

周丽丽, 姚欣茹, 汤征宇, 任巧悦, 吕雪靖, 胡理. (2017). 触觉信息处理及其脑机制. *科技导报, 35*(19), 37–43.

Amedi, A., Jacobson, G., Hendler, T., Malach, R., & Zohary, E. (2002). Convergence of visual and tactile shape processing in the human lateral occipital complex. *Cerebral Cortex, 12*(11), 1202–1212.

Barros, P., Maciel-Junior, N. T., Fernandes, B. J. T., Bezerra, B. L. D., & Fernandes, S. M. M. (2017). A dynamic gesture recognition and prediction system using the convexity approach. *Computer Vision and Image Understanding, 155*, 139–149.

Bauer, C., Yazzolino, L., Hirsch, G., Cattaneo, Z., Vecchi, T., & Merabet, L. B. (2015). Neural correlates associated with superior tactile symmetry perception in the early blind. *Cortex, 63*, 104–117.

Baumgartner, E., Wiebel, C. B., & Gegenfurtner, K. R. (2015). A comparison of haptic material perception in blind and sighted individuals. *Vision Research, 115*, 238–245.

Behrmann, M., & Ewell, C. (2003). Expertise in tactile pattern recognition. *Psychological Science, 14*(5), 480–486.

Bellik, Y., & Clavel, C. (2017). Geometrical shapes rendering on a dot-matrix display. *International Conference on Intelligent Human Computer Interaction* (pp. 8–18). Springer, Cham.

Bouaziz, S., Russier, S., & Magnan, A. (2005). The copying of complex geometric drawings by sighted and visually impaired children. *Journal of Visual Impairment & Blindness, 99*(12), 765–774.

Brock, A. M., Truillet, P., Oriola, B., Picard, D., & Jouffrais, C. (2015). Interactivity improves usability of geographic maps for visually impaired people. *Human-Computer Interaction, 30*(2), 156–194.

Cattaneo, Z., Vecchi, T., Cornoldi, C., Mammarella, I., Bonino, D., Ricciardi, E., & Pietrini, P. (2008). Imagery and spatial processes in blindness and visual impairment. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 32*(8), 1346–1360.

Cattaneo, Z., Vecchi, T., Monegato, M., Pece, A., & Cornoldi, C. (2007). Effects of late visual impairment on mental representations activated by visual and tactile stimuli. *Brain Research, 1148*, 170–176.

Cecchetto, S., & Lawson, R. (2017). Regularity detection by haptics and vision. *Journal of Experimental Psychology Human Perception & Performance, 43*(1), 103.

Chang, D., Nesbitt, K. V., & Wilkins, K. (2007). *The Gestalt principles of similarity and proximity apply to both the haptic and visual grouping of elements*. Paper presented at the Eight Australasian User Interface Conference (AUIC2007), Ballarat, Australia.

Cornoldi, C., Tinti, C., Mammarella, I. C., Re, A. M., & Varotto, D. (2009). Memory for an imagined pathway and strategy effects in sighted and in totally congenitally blind individuals. *Acta Psychologica, 130*(1), 11–16.

Gallace, A., & Spence, C. (2011). To what extent do gestalt grouping principles influence tactile perception? *Psychological Bulletin, 137*(4), 538–561.

Grunwald, M., Muniyandi, M., Kim, H., Kim, J., Krause, F., Mueller, S., & Srinivasan, M. A. (2014). Human haptic perception is interrupted by explorative stops of milliseconds. *Front Psychol, 5*(4), 292.

Gual, J., Puyuelo, M., & Lloveras, J. (2015). The effect of volumetric (3D) tactile symbols within inclusive tactile maps. *Applied Ergonomics, 48*, 1–10.

Hatwell, Y., Streri, A., & Gentaz, E. (2003). *Touching for knowing: Cognitive psychology of haptic manual perception*, John Benjamins Pub.

Heller, M. A., Brackett, D. D., Scroggs, E., Steffen, H., Heatherly, K., & Salik, S. (2002). Tangible pictures: Viewpoint effects and linear perspective in visually impaired people. *Perception, 31*(6), 747–769.

Heller, M. A., Kennedy, J. M., Clark, A., McCarthy, M., Borgert, A., Wemple, L., ... Riddle, T. (2006). Viewpoint and orientation influence picture recognition in the blind. *Perception, 35*(10), 1397–1420.

Heller, M. A., McCarthy, M., & Clark, A. (2005). Pattern perception and pictures for the blind. *Psicologica, 26*(1), 161–171.

Heller, M. A., Riddle, T., Fulkerson, E., Wemple, L., Walk, A. M., Guthrie, S., ... Klaus, P. (2009). The influence of viewpoint and object detail in blind people when matching pictures to complex objects. *Perception, 38*(8), 1234–1250.

Kaas, A. L., van Mier, H., Visser, M., & Goebel, R. (2013).

The neural substrate for working memory of tactile surface texture. *Human Brain Mapping, 34*(5), 1148–1162.

Kalia, A., Hopkins, R., Jin, D., Yazzolino, L., Verma, S., Merabet, L., ... Sinha, P. (2014). Perception of tactile graphics: Embossings versus cutouts. *Multisensory Research, 27*(2), 111–125.

Kalia, A. A., & Sinha, P. (2012). Tactile Picture Recognition: Errors are in shape acquisition or object matching? *Seeing and Perceiving, 25*(3-4), 287–302.

Kappers, A. M. L., & Tiest, W. M. B. (2013). Haptic perception. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Cognitive Science, 4*(4), 357–374.

Kennedy, J. M., & Juricevic, I. (2006). Foreshortening, convergence and drawings from a blind adult. *Perception, 35*(6), 847–851.

Klatzky, R. L., & Lederman, S. J. (1988). The intelligent hand. *Psychology of Learning & Motivation, 21*, 121–151.

Ku, Y., Zhao, D., Bodner, M., & Zhou, Y-D. (2015). Cooperative processing in primary somatosensory cortex and posterior parietal cortex during tactile working memory. *European Journal of Neuroscience, 42*(3), 1905–1911.

Lacey, S., & Lawson, R. (2013). *Multisensory Imagery*. Springer.

Lacey, S., & Sathian, K. (2014). Visuo-haptic multisensory object recognition, categorization, and representation. *Frontiers in Psychology, 5*.

Lacey, S., Stilla, R., Sreenivasan, K., Deshpande, G., & Sathian, K. (2014). Spatial imagery in haptic shape perception. *Neuropsychologia, 60*, 144–158.

Lebaz, S., Jouffrais, C., & Picard, D. (2012). Haptic identification of raised-line drawings: High visuospatial imagers outperform low visuospatial imagers. *Psychological Research-Psychologische Forschung, 76*(5), 667–675.

Lebaz, S., Picard, D., & Jouffrais, C. (2010). Haptic recognition of non-figurative tactile pictures in the blind: Does life-time proportion without visual experience matter? *Haptics: Generating and Perceiving Tangible Sensations, Pt Ii, Proceedings, 65*(5), 412–417.

Lederman, S. J., Klatzky, R. L., Chataway, C., & Summers, C. D. (1990). Visual mediation and the haptic recognition of 2-dimensional pictures of common objects. *Perception & Psychophysics, 47*(1), 54–64.

Longo, M. R., & Golubova, O. (2017). Mapping the internal geometry of tactile space. *Journal of Experimental Psychology-Human Perception and Performance, 43*(10), 1815–1827.

Loomis, J. M., Klatzky, R. L., & Lederman, S. J. (1991). Similarity of tactual and visual picture recognition with limited field of view. *Perception, 20*(2), 167–177.

Mazella, A., Albaret, J. M., & Picard, D. (2014). Haptic tests for use with children and adults with visual impairments: A literature review. *Journal of Visual Impairment & Blindness, 108*(108), 227–237.

Mazella, A., Albaret, J-M., & Picard, D. (2016). Haptic-2D: A new haptic test battery assessing the tactual abilities of sighted and visually impaired children and adolescents with two-dimensional raised materials. *Research in Developmental Disabilities, 48*, 103–123.

Mazella, A., Albaret, J-M., & Picard, D. (2018). The development of haptic processing skills from childhood to adulthood by means of two-dimensional materials. *Canadian Journal of Experimental Psychology-Revue Canadienne De Psychologie Experimentale, 72*(1), 48–57.

Memeo, M., Campus, C., & Brayda, L. (2014). Do blind subjects differ from sighted subjects when exploring virtual tactile maps? *Computers Helping People with Special Needs, Icchp 2014, 8548*, 12–17.

Morash, V. S., Pensky, A. E. C., Tseng, S. T. W., & Miele, J. A. (2014). Effects of using multiple hands and fingers on haptic performance in individuals who are blind. *Perception, 43*(6), 569–588.

Overvliet, K. E., & Krampe, R. T. (2018). Haptic two-dimensional shape identification in children, adolescents, and young adults. *Journal of Experimental Child Psychology, 166*, 567–580.

Overvliet, K. E., Krampe, R. T., & Wagemans, J. (2012). Perceptual grouping in haptic search: The influence of proximity, similarity, and good continuation. *Journal of Experimental Psychology-Human Perception and Performance, 38*(4), 817–821.

Overvliet, K. E., Wagemans, J., & Krampe, R. T. (2013). The effects of aging on haptic 2D shape recognition. *Psychology and Aging, 28*(4), 1057–1069.

Pawluk, D. T., Adams, R. J., & Kitada, R. (2015). Designing haptic assistive technology for individuals who are blind or visually impaired. *Ieee Transactions on Haptics, 8*(3), 258–278.

Picard, D., Albaret, J. M., & Mazella, A. (2013). Haptic identification of raised-line drawings by children, adolescents and young adults. *Haptics-e, 5*(2), 24–28.

Picard, D., Albaret, J-M., & Mazella, A. (2014). Haptic identification of raised-line drawings when categorical information is given: A comparison between visually impaired and sighted children. *Psicologica, 35*(2), 277–290.

Picard, D., Lebaz, S., Jouffrais, C., & Monnier, C. (2010). Haptic recognition of two-dimensional raised-line patterns by early-blind, late-blind, and blindfolded sighted adults. *Perception, 39*(2), 224–235.

Picard, D., & Monnier, C. (2009). Short-term memory for

spatial configurations in the tactile modality: A comparison with vision. *Memory, 17*(8), 789–801.

Rastogi, R., Pawluk, T. V. D., & Ketchum, J. (2013). Intuitive tactile zooming for graphics accessed by individuals who are blind and visually impaired. *Ieee Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 21*(4), 655–663.

Saal, H. P., & Bensmaia, S. J. (2014). Touch is a team effort: Interplay of submodalities in cutaneous sensibility. *Trends in Neurosciences, 37*(12), 689–697.

Sathian, K. (2016). Analysis of haptic information in the cerebral cortex. *Journal of Neurophysiology, 116*(4), 1795–1806.

Segond, H., Weiss, D., Kawalec, M., & Sampaio, E. (2013). Perceiving space and optical cues via a visuo-tactile sensory substitution system: A methodological approach for training of blind subjects for navigation. *Perception, 42*(5), 508–528.

Snow, J. C., Goodale, M. A., & Culham, J. C. (2015). Preserved haptic shape processing after bilateral LOC lesions. *Journal of Neuroscience, 35*(40), 13745–13760.

Stilla, R., & Sathian, K. (2008). Selective visuo-haptic processing of shape and texture. *Human Brain Mapping, 29*(10), 1123–1138.

Symmons, M., & Richardson, B. (2000). Raised line drawings are spontaneously explored with a single finger. *Perception, 29*(5), 621–626.

Theurel, A., Witt, A., Claudet, P., Hatwell, Y., & Gentaz, E. (2013). Tactile picture recognition by early blind children: The effect of illustration technique. *Journal of Experimental Psychology-Applied, 19*(3), 233–240.

Toderita, I., Bourgeon, S., Voisin, J. I. A., & Chapman, C. E. (2014). Haptic two-dimensional angle categorization and discrimination. *Experimental Brain Research, 232*(2), 369–383.

Trief, E., Cascella, P. W., & Bruce, S. M. (2013). A field study of a standardized tangible symbol system for learners who are visually impaired and have multiple disabilities. *Journal of Visual Impairment & Blindness, 107*(3), 180–191.

Van Aarsen, V., & Overvliet, K. E. (2016). Perceptual grouping by similarity of surface roughness in haptics: The influence of task difficulty. *Experimental Brain Research, 234*(8), 2227–2234.

Vidal-Verdu, F., & Hafez, M. (2007). Graphical tactile displays for visually-impaired people. *IEEE Transactions on Neural Systems & Rehabilitation Engineering, 15*(1), 119–130.

Vinter, A., Fernandes, V., Orlandi, O., & Morgan, P. (2012). Exploratory procedures of tactile images in visually impaired and blindfolded sighted children: How they relate to their consequent performance in drawing. *Research in Developmental Disabilities, 33*(6), 1819–1831.

Wijntjes, M. W. A., & Kappers, A. M. L. (2007). Angle discrimination in raised-line drawings. *Perception, 36*(6), 865–879.

Wijntjes, M. W. A., van Lienen, T., Verstijnen, I. M., & Kappers, A. M. L. (2008). The influence of picture size on recognition and exploratory behaviour in raised-line drawings. *Perception, 37*(4), 602–614.

Wnuczko, M., & Kennedy, J. M. (2014). Pointing to azimuths and elevations of targets: Blind and blindfolded-sighted. *Perception, 43*(2–3), 117–128.

Yang, J., Kitada, R., Kochiyama, T., Yu, Y., Kai, M., Araki, Y., ... Sadato, N. (2017). Brain networks involved in tactile speed classification of moving dot patterns: The effects of speed and dot periodicity. *Scientific Reports, 7*(40931).

Yang, J., Yu, Y., Kunita, A., Qiang, H., Wu, J., Sawamoto, N., & Fukuyama, H. (2014). Tactile priming modulates the activation of the fronto-parietal circuit during tactile angle match and non-match processing: An fMRI study. *Frontiers in Human Neuroscience, 8*(926), 926.

Yau, J. M., Kim, S. S., Thakur, P. H., & Bensmaia, S. J. (2016). Feeling form: the neural basis of haptic shape perception. *Journal of Neurophysiology, 115*(2), 631–642.

Yoshida, T., Yamaguchi, A., Tsutsui, H., & Wake, T. (2015). Tactile search for change has less memory than visual search for change. *Attention Perception & Psychophysics, 77*(4), 1200–1211.

Yu, J., Wu, Q., Yang, J., Takahashi, S., Ejima, Y., & Wu, J. (2017). A study of shape discrimination for tactile guide maps. *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation* (pp.565–570). IEEE.

The cognitive mechanism of haptic recognition of two-dimension images

YU Wenyuan[1,2]; LIU Ye[1,2]; FU Xiaolan[1,2]; GONG Jiangtao[3,4]; XU Yingqing[3,4]

([1] *State Key Laboratory of Brain and Cognitive Science, Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*) ([2] *Department of Psychology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

([3] *Department of Information Art and Design, Academy of Arts and Design, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China*) ([4] *The Future Lab, Tsinghua University Beijing* 100084, *China*)

Abstract: The two-dimension tactile image is the main approach of translating visual information into haptic information. It plays an important role in helping visually impaired people perceive the external world. The recognition of haptic two-dimension image is considered to be based on the "visual translation" process where the haptic input is translated into the visual image. This process is influenced by the graphic geometric feature, perspective, visual experience, capability of visual representation, the process of tactile exploration, training and age. Exploration of the cognitive neural mechanism of two-dimension images haptic recognition is significant for improving the design and usability of two-dimension tactile images.

Key words: two-dimension tactile images; touch; haptic perception; visually impaired people